П. А. Попов

Транзистор как четырехполюсник



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 597

П. А. ПОПОВ

ТРАНЗИСТОР КАК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1966 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.382 311.3
П 57

В брошюре излагается метод расчета транзисторных усилителей, основанный на представлении транзистора в виде четырехполюсника. Рассмотрены системы параметров четырехполюсника, связь между параметрами, относящимися к разным системам или к разным схемам включения транзистора, последовательность и приемы расчета многокаскадного усилителя. Приведены таблицы, необходимые для выполнения расчета усилителей, и даны примеры расчета.

Предназначена для подготовленных радиолюбителей.

Попов Петр Александрович
Транзистор как четырехполюсник
М.—Л., издательство „Энергия", 1966. 40 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 597)

3-4-5
356-66

Редактор *Т. В. Фомичева* Техн. редактор *О. П. Печенкина*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 30/X 1965 г. Подписано к печати 16/III 1966 г.
Т-04031 Формат 84×108$^1/_{32}$ Печ. л. 2,01 Уч.-изд. л. 1,97
Тираж 40 000 экз. Цена 08 коп. Зак. 720

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Теория четырехполюсника длительное время считалась специальной областью знаний, связанной с исследованием и расчетом пассивных электрических цепей. Несколько лет тому назад положение существенно изменилось, и этот раздел электротехники привлек к себе внимание многочисленной армии инженеров и техников, занимающихся разработкой и конструированием полупроводниковой аппаратуры. Причина заключается в том, что теория четырехполюсника оказалась весьма удобным математическим аппаратом для расчета транзисторных устройств, работающих в режиме малых сигналов.

Строго говоря, методы этой теории в равной степени применимы к расчету схем с любыми усилительными элементами, в том числе и с электронными лампами. Но основные расчетные формулы для усилительных каскадов на лампах значительно упрощаются благодаря высокому входному сопротивлению ламп. Малая величина входного сопротивления транзистора и наличие значительной внутренней обратной связи между выходными и входными электродами усложняет картину распределения токов в транзисторном каскаде и соответствующие расчетные формулы.

Представляя транзистор в виде четырехполюсника, удается свести расчет любой многокаскадной схемы к последовательному и в значительной степени формальному выполнению ряда несложных алгебраических операций. Это является главным достоинством метода.

Однако было бы ошибкой считать, что знакомство с теорией четырехполюсника избавляет от необходимости изучения принципов работы транзисторных схем. Для составления схемы и определения большинства величин

ее элементов необходимо знать физические основы работы транзистора, особенности и свойства транзистора как усилительного элемента и многие другие вопросы, составляющие содержание транзисторной электроники. Только при этом условии можно говорить о творческом подходе к выполнению расчета.

Эту брошюру можно рассматривать как дополнение к изданной в 1964 г. массовой радиобиблиотекой книге «Расчет транзисторных усилителей звуковой частоты» (выпуск 550).

ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

В настоящее время наибольшее распространение получили два метода расчета транзисторных усилительных каскадов: расчет с применением эквивалентных схем транзисторов и расчет, основанный на представлении транзистора в виде четырехполюсника. В первом случае, приступая к расчету, каждый транзистор в схеме рассчитываемого устройства заменяют соответствующей эквивалентной схемой, во втором случае — четырехполюсником. (Здесь и далее под схемой устройства подразумевается графическое изображение электрической цепи с помощью принятых условных обозначений.)

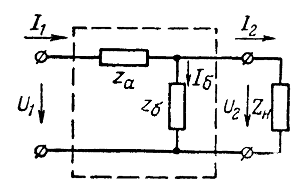


Рис. 1. К понятию о четырехполюснике.

Понятие о четырехполюснике поясним на следующем примере. Рассмотрим на рис. 1 заключенную в штриховой прямоугольник схему электрической цепи. Если предположить, что к правым зажимам этой цепи подключено сопротивление нагрузки $Z_н$, то при выбранных на рисунке обозначениях и положительных направлениях напряжений и токов по закону Кирхгофа будем иметь:

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= I_1 z_а + U_2, \\ I_2 &= I_1 - I_б = I_1 - \frac{U_2}{z_б}. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Считаем, что в этих формулах величины $z_а$ и $z_б$ являются заданными, величины I_1 и U_2 выбираются произвольно. Тогда получаем из соотношений (1) вполне определенные значения величин U_1 и I_2.

I_1 и U_2 можно называть независимыми переменными, а величины U_1 и I_2 — зависимыми переменными. Формулы (1) показывают, какие ариф-

метические действия необходимо произвести над выбранными значениями независимых переменных, чтобы получить соответствующие им значения зависимых переменных Итак, вместо рассмотрения и анализа самой схемы рассчитываемого устройства можно оперировать с системой из двух уравнений, характеризующих свойства этой схемы. О самой же схеме, помимо упомянутых двух уравнений, известно только то, что она имеет два входных и два выходных зажима.

Электрическую цепь любой сложности, имеющую две пары выделенных зажимов (входную и выходную), называют четырехполюсником. Предполагается, что ко входной паре зажимов подключается внешний источник энергии (генератор), а к выходной паре — потребитель (нагрузка).

Четырехполюсник называется пассивным, если в его внутренней схеме отсутствуют источники энергии (генераторы, батареи). В противном случае четырехполюсник называется активным. Напряжение на входных зажимах четырехполюсника и входной ток обозначают символами U_1 и I_1, выходное напряжение и ток — символами U_2 и I_2

В теории электрических цепей доказывается, что любые две величины из четырех перечисленных можно выразить через две другие с помощью коэффициентов пропорциональности. Например, при известных величинах напряжений U_1 и U_2 токи I_1 и I_2 можно найти из соотношений

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= y_{11}U_1 + y_{12}U_2, \\ I_2 &= y_{21}U_1 + y_{22}U_2, \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где коэффициенты пропорциональности y_{11}, y_{12}, y_{21} и y_{22} предполагаются известными (заранее заданными или измеренными перед началом расчета).

Поскольку выбрать две величины из четырех можно шестью разными способами, то соответственно можно составить шесть пар соотношений, подобных приведенному выше. В частности, при известных токах I_1 и I_2 соотношения между токами и напряжениями можно записать в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= z_{11}I_1 + z_{12}I_2, \\ U_2 &= z_{21}I_1 + z_{22}I_2, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

а при известных U_2 и I_1 соотношения приобретают вид:

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2, \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2. \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Частным случаем формул (4) являются полученные нами ранее формулы (1), в которых следует принять $z_а = h_{11}$, $h_{12} = 1$, $h_{21} = 1$, $h_{22} = -1/z_б$.

Коэффициенты пропорциональности во всех этих равенствах являются, в общем случае, комплексными величинами. Они характеризуют электрические свойства четырехполюсника и поэтому носят название параметров четырехполюсника.

В первой паре равенств параметры имеют размерность проводимости и соответственно называются y-параметрами (читается «игрек-параметры»). Во второй паре равенств параметры имеют размерность сопротивления и называются z-параметрами (читается «зет-параметры»). В последней паре равенств параметры называются h-параметрами (читается «аш-параметры»).

Каждая пара равенств называется системой уравнений четырехполюсника. Первая пара является системой уравнений с y-параметрами, вторая — системой уравнений с z-параметрами, третья — системой с h-параметрами.

Любой из параметров имеет определенный физический смысл, который становится очевидным, если приравнять нулю второе слагаемое в правой части соответствующего уравнения. Например, желая выяснить смысл параметра h_{11}, следует предположить, что напряжение U_2 в правой части первого уравнения системы (4) равно нулю. Это соответствует режиму короткого замыкания выходных зажимов четырехполюсника.

Приравняв величину U_2 в упомянутом уравнении нулю, находим:

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \text{ при } U_2 = 0,$$

т. е. параметр h_{11} численно равен величине входного сопротивления четырехполюсника при замкнутых накоротко его выходных зажимах.

Условное изображение четырехполюсника показано

на рис. 2. На этом же рисунке стрелками обозначены направления токов и напряжений, которые в дальнейшем мы будем принимать за положительные. Следует обратить внимание на выбор положительного направления тока I_2: ток направлен внутрь четырехполюсника. Если бы ток I_2 имел такое же направление, как на рис. 1, то для напряжения на выходных зажимах было бы справедливо равенство

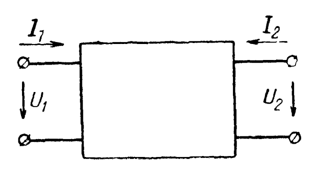


Рис. 2 Условное изображение четырехполюсника

$$U_2 = I_2 Z_н. \qquad (5)$$

При выбранном на рис. 2 положительном направлении тока получим:

$$U_2 = -I_2 Z_н. \qquad (6)$$

Действительно, записывая соотношение (5) для участка цепи, имеющего сопротивление $Z_н$, подразумевают, что положительное направление тока на этом участке совпадает с положительным направлением падения напряжения на этом участке. (За положительное направление падения напряжения принимают направление от точки с высшим потенциалом к точке с низшим.) Изменение направления тока на противоположное (т. е. знака «плюс» на «минус») влечет за собой изменение знака напряжения (падения напряжения) на соответствующем участке цепи.

Параметры некоторых простейших четырехполюсников приведены в табл. 1. В каждой клетке таблицы аналитические выражения параметров расположены в таком же порядке, в каком расположены сами параметры в соответствующих системах уравнений. Совокупность четырех параметров, относящихся к одной системе уравнений и определенным образом расположенных при записи, называется **матрицей** системы уравнений. Например, матрица системы уравнений с y-параметрами (y-матрица) имеет вид:

$$\begin{Vmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{Vmatrix}.$$

Очевидно, первая цифра в индексе каждого параметра обозначает строку матрицы, а вторая цифра — стол-

Параметры некоторых четырехполюсников

Таблица 1

	z		*y*		*h*		*a*	
Z	∞	∞	$\frac{1}{z}$	$-\frac{1}{z}$	z	1	1	z
	∞	∞	$-\frac{1}{z}$	$\frac{1}{z}$	-1	0	0	1
Z	z	z	∞	∞	0	1	1	0
	z	z	∞	∞	-1	$\frac{1}{z}$	$\frac{1}{z}$	1
Z_1, Z_2	z_2	z_2	$\frac{z_1+z_2}{z_1 z_2}$	$-\frac{1}{z_1}$	$\frac{z_1 z_2}{z_1+z_2}$	$\frac{z_2}{z_1+z_2}$	1	z_1
	z_2	z_1+z_2	$-\frac{1}{z_1}$	$\frac{1}{z_1}$	$-\frac{z_2}{z_1+z_2}$	$\frac{1}{z_1+z_2}$	$\frac{1}{z_2}$	$\frac{z_1+z_2}{z_2}$

Примечание. Положительные направления токов и напряжений на зажимах четырехполюсника соответствуют изображенным на рис. 2.

бец матрицы, в котором находится соответствующий параметр. Следовательно, в каждой клетке табл 1 записана соответствующая матрица параметров.

При расчете электрической цепи чаще всего приходится вычислять такие ее параметры, как входное $Z_{вх}$ и выходное $Z_{вых}$ сопротивления, коэффициент усиления (коэффициент передачи) тока $K_т$, а также коэффициент усиления (коэффициент передачи) напряжения $K_н$ при заданных сопротивлениях генератора и нагрузки. Если при расчете заменить цепь эквивалентным четырехполюсником, то все величины можно выразить через параметры четырехполюсника и величины его нагрузочных сопротивлений $Z_г$ и $Z_н$.

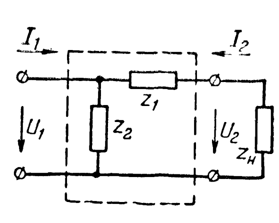


Рис 3 К примеру расчета

Формулы для расчета величин $Z_{вх}$, $Z_{вых}$, $K_т$ и $K_н$ в четырех системах параметров приведены в табл. 2. Формула для определения коэффициента усиления (коэффициента передачи) мощности $K_м$ в таблице не приводится, так как она является производной от имеющихся в таблице:

$$K_м = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = K_н K_т. \quad (7)$$

Пример 1. Определить, применяя табл 1 и 2, коэффициент передачи тока четырехполюсника, представленного на рис 3, полагая $z_1 = z_2 = Z_н = 100$ *ом*

Решение Воспользовавшись системой z-параметров, по табл 2 находим

$$K_т = \frac{-z_{21}}{z_{22} + Z_н} = \frac{-100}{200 + 100} = -0{,}33,$$

где в соответствии с табл 1

$$z_{21} = z_2 = 100 \text{ ом}$$

и

$$z_{22} = z_1 + z_2 = 100 + 100 = 200 \text{ ом}$$

Отрицательная величина $K_т$ означает, что действительное направление выходного тока противоположно принятому за положительное на рис 2, если действительное направление входного тока совпадает с принятым за положительное на этом же рисунке

Таблица 2

Параметры усилительного каскада и усилителя

	z	y	h	a
Входное сопротивление $Z_{вх}$	$\frac{D_z + z_{11}Z_н}{z_{22} + Z_н}$	$\frac{y_{22} + Y_н}{D_y + y_{11}Y_н}$	$\frac{D_h + h_{11}Y_н}{h_{22} + Y_н}$	$\frac{a_{11}Z_н + a_{12}}{a_{21}Z_н + a_{22}}$
Выходное сопротивление $Z_{вых}$	$\frac{D_z + z_{22}Z_г}{z_{11} + Z_г}$	$\frac{y_{11} + Y_г}{D_y + y_{22}Y_г}$	$\frac{h_{11} + Z_г}{D_h + h_{22}Z_г}$	$\frac{a_{22}Z_г + a_{12}}{a_{21}Z_г + a_{11}}$
Усиление по току $K_т = I_2/I_1$	$\frac{-z_{21}}{z_{22} + Z_н}$	$\frac{y_{21}Y_н}{D_y + y_{11}Y_н}$	$\frac{h_{21}Y_н}{h_{22} + Y_н}$	$\frac{-1}{a_{22} + a_{21}Z_н}$
Усиление по напряжению $K_н = U_2/U_1$	$\frac{z_{21}Z_н}{D_z + z_{11}Z_н}$	$\frac{-y_{21}}{y_{22} + Y_н}$	$\frac{-h_{21}Z_н}{h_{11} + D_hZ_н}$	$\frac{Z_н}{a_{12} + a_{11}Z_н}$

$$D_z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}; \quad D_y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}; \quad D_h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}; \quad Y_н = \frac{1}{Z_н}; \quad Y_г = \frac{1}{Z_г}.$$

ТРАНЗИСТОР КАК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

Изложенные в предыдущем параграфе соображения относились к так называемым линейным электрическим цепям, т. е. к цепям, составленным из линейных элементов (сопротивлений). Линейными называются такие сопротивления, величина которых не зависит от величины приложенного к ним напряжения или протекающего тока.

График зависимости $I=\varphi(U)$ для линейного сопротивления имеет вид прямой линии (при равномерном масштабе по обеим осям). Если в цепи имеется электронная лампа или транзистор, то картина резко меняется. Зависимость тока в двух любых электродах транзистора от приложенного напряжения существенно отличается от линейной при достаточно больших пределах изменения напряжения.

Следовательно, транзистор, вообще говоря, является нелинейным элементом.

Однако при малых изменениях напряжений, приложенных между электродами, эта нелинейность становится несущественной. Подключим к транзистору источники питания и установим определенную рабочую точку транзистора (напряжение коллектор — эмиттер $U_{кэ}$ и ток коллектора $I_к$). Разумеется, чтобы создать ток в цепи коллектора, потребуется создать вполне определенный ток $I_б$ в цепи базы При этом между выводами эмиттера и базы также будет существовать некоторое постоянное напряжение $U_{бэ}$ Приложим между этими же двумя выводами переменное напряжение, амплитуду которого выберем в несколько раз меньшей, чем величина напряжения $U_{бэ}$. Тогда во всех электродах транзистора появятся переменные составляющие тока, амплитуда которых будет пропорциональна амплитуде переменной составляющей напряжения между входными электродами.

Это обстоятельство позволяет при малых сигналах рассматривать транзистор как линейный активный четырехполюсник и применить к расчету транзисторного усилителя методы теории линейного четырехполюсника. Подобно пассивным четырехполюсникам транзистор полностью характеризуется заданием любой из шести известных систем параметров. (Система уравнений с ха-

рактеристическими параметрами здесь не рассматривается).

Такие параметры транзистора иногда называют малосигнальными, чтобы отразить в названии область их применения (малая величина переменной составляющей тока или напряжения).

Типовые значения малосигнальных параметров транзистора можно найти в справочниках.

Параметры конкретного образца транзистора всегда можно измерить, исходя из физического смысла каждого параметра.

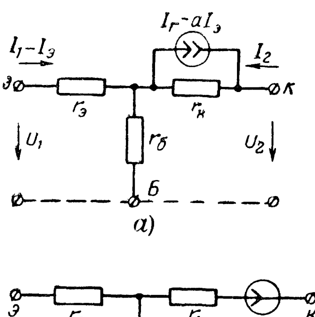
Заметим, что измерение малосигнальных параметров транзистора имеет одну особенность по сравнению с измерением параметров пассивного четырехполюсника. Анализируя аналитические выражения параметров, соответствующих различным системам, можно убедиться, что измерение параметров сводится к измерению напряжений на входе и выходе четырехполюсника, а также токов во входной и выходной цепях в режиме холостого хода или короткого замыкания одной из пар зажимов. В случае пассивного четырехполюсника режим холостого хода означает обрыв соответствующей цепи, а режим короткого замыкания — замыкание соответствующей пары зажимов. В случае измерения малосигнальных параметров транзистора режим холостого хода или короткого замыкания должен быть обеспечен только по переменной составляющей тока или напряжения. Это надо сделать таким образом, чтобы изменение режима работы транзистора по переменной составляющей никак не отражалось на выбранном и установленном режиме транзистора по постоянной составляющей. Практически для создания режима короткого замыкания по переменной составляющей между какими-либо двумя электродами включают между ними конденсатор достаточно большой емкости. Режим холостого хода обеспечивают, включая в цепь измеряемого электрода большое сопротивление, дроссель, параллельный колебательный контур или активный двухполюсник с транзисторами или электронными лампами.

Следует иметь в виду, что почти все параметры транзистора сильно зависят от выбранной рабочей точки транзистора, его температуры, а также от схемы включения транзистора по переменному току.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПО ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЕ ТРАНЗИСТОРА

Малосигнальные параметры транзистора можно вычислить, располагая величинами элементов эквивалентной схемы транзистора.

На рис. 4,*а* изображена Т-образная эквивалентная схема с зависимым генератором тока, управляемым током эмиттера, а на рис. 4,*б* — схема с зависимым генератором э. д. с. Названия сопротивлений, образующих эквивалентную схему, совпадают с названиями электродов транзистора:



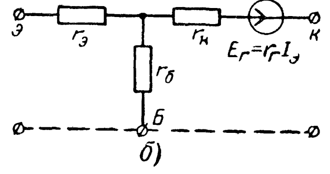


Рис 4 Эквивалентные схемы транзистора.

а — с зависимым генератором тока, *б* — с зависимым генератором э. д. с.

$r_э$ — сопротивление эмиттера (эмиттерного перехода);

$r_б$ — сопротивление базы;

$r_к$ — сопротивление коллектора (коллекторного перехода).

Обе схемы справедливы только для диапазона низких и средних звуковых частот.

Рассматривая схему на рис. 4,*а*, находим следующие зависимости.

1) Выходная проводимость схемы при разомкнутых входных зажимах (параметр h_{22}) равна:

$$h_{22} = \frac{1}{r_б + r_к}. \qquad (8)$$

(При обрыве цепи эмиттера зависимый генератор в обеих схемах выключается.)

2) Отношение напряжения на входных зажимах к напряжению на выходных зажимах при разомкнутой входной цепи (параметр h_{12}) равно:

$$h_{12} = \frac{r_б}{r_б + r_к}. \qquad (9)$$

(Предполагается, что источник напряжения U_2 подключен к выходным зажимам схемы)

Применяя к этой же схеме уравнения Кирхгофа, можно получить еще две зависимости

1) Отношение выходного тока ко входному в режиме короткого замыкания выходных зажимов транзистора (параметр h_{21}) равно:

$$h_{21} = -\frac{a + \frac{r_б}{r_к}}{1 + \frac{r_б}{r_к}}. \tag{10}$$

Поскольку $a \approx 1$, а $r_б/r_к \ll 1$, то, пренебрегая вторым слагаемым в числителе и знаменателе правой части равенства (10), получим:

$$h_{21} \approx -a. \tag{11}$$

Поясним, что величина a в формулах (10) и (11) представляет собой коэффициент пропорциональности между током эмиттера $I_э$ и током зависимого генератора $I_г = aI_э$ в схеме на рис. 4,*а*. Коэффициент a не следует смешивать с коэффициентом α («альфа»). Последний определяется формулой

$$\alpha = |h_{21}|. \tag{12}$$

Сравнивая (10) и (12), убеждаемся, что величины a и α, вообще говоря, отличаются друг от друга. Но эта разница настолько мала, что практически ее можно не учитывать.

2) Входное сопротивление схемы на рис 4,*а* при замкнутых накоротко ее выходных зажимах (параметр h_{11}) определяется формулой

$$h_{11} = r_э + r_б(1 - \alpha). \tag{13}$$

Полученные формулы позволяют по известным величинам элементов Т-образной схемы с зависимым генератором тока (рис. 4,*а*) определить h-параметры четырехполюсника, эквивалентного этой схеме.

Если известны величины элементов эквивалентной схемы с зависимым генератором э д с. $E_г = r_г I_э$, то опре-

деление h-параметров можно осуществить по формулам (8-13), если предварительно вычислить параметр a:

$$a = \frac{r_г}{r_к}. \qquad (14)$$

Пример 2. Значения величин элементов Т-образной эквивалентной схемы с генератором тока для транзистора типа П13 при $I_э = 1$ *ма* и $U_{к\,б} = -5$ *в* равны. $r_э = 15$ *ом*, $r_б = 250$ *ом*, $r_к = 1$ *Мом*; $a = 0{,}925$. Определить h-параметры четырехполюсника, эквивалентного транзистору, включенному по схеме с общей базой

Решение. Применяя формулы (13), (9), (11) и (8), соответственно находим

$$h_{11б} = r_э + r_б(1 - \alpha) = 15 + 250(1 - 0{,}925) = 34 \text{ ом},$$

где $\alpha \approx a$,

$$h_{12б} = \frac{r_б}{r_б + r_к} = \frac{250}{250 + 1\cdot 10^6} \approx 2{,}5\cdot 10^{-4};$$

$$h_{21б} \approx -a = -0{,}925;$$

$$h_{22б} = \frac{1}{r_б + r_к} = \frac{1}{250 + 1\cdot 10^6} \approx 1\cdot 10^{-6} \text{ сим}.$$

О ТАБЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ

Упоминалось, что значения параметров транзистора, необходимые для расчета, могут быть либо найдены путем измерения, либо взяты из справочника.

В справочниках принято указывать для каждого из малосигнальных параметров три значения: минимальное, типичное и максимальное. Казалось бы, при расчете вполне допустимо и логично ориентироваться на типичные значения параметров и подставлять их в соответствующие формулы. Однако, приняв для расчета приводимые в справочниках типичные значения параметров без предварительной проверки возможности их физической реализации, можно прийти к абсурдным результатам.

Дело в том, что между четырьмя численными значениями параметров, характеризующих о д и н и т о т ж е транзистор, существуют вполне определенные соотношения, тогда как в справочниках даются у с р е д н е н н ы е значения параметров, которые в отдельных случаях мо-

гут этим соотношениям не удовлетворять. Иными словами, рекомендуемые в качестве типичных, значения параметров иногда оказываются не совместимыми друг с другом.

Проверку совместимости четырех параметров транзистора можно осуществить, вычислив по этим параметрам величины пассивных сопротивлений Т-образной эквивалентной схемы с одним зависимым генератором э. д. с. или тока.

Известно, что все три сопротивления эквивалентной Т-образной схемы с одним зависимым генератором должны быть положительными. Это условие можно принять в качестве критерия совместимости выбранных величин четырех параметров. Выведем формулы для определения величин сопротивлений Т-образной схемы по известным h-параметрам транзистора, включенного по схеме с общей базой.

Разделив почленно правые и левые части равенств (9) и (8), получим:

$$r_б = \frac{h_{12}}{h_{22}}. \tag{15}$$

Решая (13) относительно $r_э$, найдем:

$$r_э = h_{11} - r_б(1-\alpha), \tag{16}$$

где величина α определяется формулой (12).

Величину сопротивления $r_к$ можно найти из (8):

$$r_к = \frac{1}{h_{22}} - r_б \approx \frac{1}{h_{22}}. \tag{17}$$

Пример 3. Определить, являются ли совместимыми «типичные» значения параметров транзистора П13, включенного по схеме с общей базой: $h_{11}=28$ *ом*; $h_{12}=10^{-3}$; $h_{21}=-0{,}94$; $h_{22}=1$ *мксим*. Параметры заданы для рабочей точки $I_э=1$ *ма*, $U_{к\,б}=-5$ *в*.

Решение. Определим величины сопротивлений $r_б$ и $r_э$ эквивалентной схемы по формулам (15) и (16):

$$r_б = \frac{h_{12}}{h_{22}} = \frac{1\cdot 10^{-3}}{1\cdot 10^{-6}} = 10^3 \text{ ом};$$

$$r_э = h_{11} - r_б(1-\alpha) = 28 - 10^3(1-0{,}94) = -32 \text{ ом},$$

где

$$\alpha = |h_{21}| = 0{,}94.$$

Поскольку параметр $r_э$ получился отрицательным, приведенные в условии задачи значения параметров являются несовместимыми. Отрицательное значение сопротивления $r_э$ обусловлено слишком большой величиной $r_б$, а последняя — большой величиной параметра h_{12}.

В подобных случаях (четыре параметра оказываются несовместимыми) целесообразно принять в качестве исходных данных при расчете три каких-либо h-параметра из четырех имеющихся в справочнике. Четвертый же параметр следует определить с учетом выбранных величин трех остальных параметров, задавшись дополнительно величиной одного из сопротивлений эквивалентной схемы транзистора.

Пример 4. Задавшись тремя значениями h-параметров транзистора из четырех, приведенных в предыдущем примере, определить четвертый параметр, исходя из того, что типичное значение сопротивления $r_э$ в эквивалентной схеме транзистора при $I_э=1$ *ма* и $U_{к.б}=-5$ *в* составляет 15 *ом*.

Решение. Принимаем $h_{11}=28$ *ом*; $h_{21}=-0{,}94$; $h_{22}=1$ *мксим*.

Из формулы (13) находим величину $r_б$, полагая $r_э=15$ *ом* и $\alpha=|h_{21}|$:

$$r_б=\frac{h_{11}-r_э}{1-|h_{21}|}=\frac{28-15}{1-0{,}94}\approx 217\ ом.$$

Из формулы (9) находим параметр h_{12}:

$$h_{12}=r_б h_{22}=217\cdot 10^{-6}\approx 0{,}22\cdot 10^{-3}.$$

ПЕРЕХОД ОТ ОДНОЙ СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ К ДРУГОЙ

Для практического применения любой из систем уравнений четырехполюсника вовсе не обязательно измерять или искать в справочнике параметры именно этой системы.

Между параметрами разных систем существуют определенные взаимосвязи. Поэтому, зная все четыре параметра одной какой-либо системы, всегда можно вычислить параметры любой другой системы. Переход от одной системы параметров к другой удобно осуществлять с помощью табл. 3. Символом D с буквенным индексом в этой таблице обозначена величина, называемая определителем системы. Формулы для вычисления

определителей даны в табл. 3. Порядок применения таблицы поясняется следующим примером.

Таблица 3

Пересчет параметров четырехполюсника

	z	y	h	a
z	z_{11} z_{12} z_{21} z_{22}	$\frac{y_{22}}{D_y}$ $\frac{-y_{12}}{D_y}$ $\frac{-y_{21}}{D_y}$ $\frac{y_{11}}{D_y}$	$\frac{D_h}{h_{22}}$ $\frac{h_{12}}{h_{22}}$ $\frac{-h_{21}}{h_{22}}$ $\frac{1}{h_{22}}$	$\frac{a_{11}}{a_{21}}$ $\frac{D_a}{a_{21}}$ $\frac{1}{a_{21}}$ $\frac{a_{22}}{a_{21}}$
y	$\frac{z_{22}}{D_z}$ $\frac{-z_{12}}{D_z}$ $\frac{-z_{21}}{D_z}$ $\frac{z_{11}}{D_z}$	y_{11} y_{12} y_{21} y_{22}	$\frac{1}{h_{11}}$ $\frac{-h_{12}}{h_{11}}$ $\frac{h_{21}}{h_{11}}$ $\frac{D_h}{h_{11}}$	$\frac{a_{22}}{a_{12}}$ $\frac{-D_a}{a_{12}}$ $\frac{-1}{a_{12}}$ $\frac{a_{11}}{a_{12}}$
h	$\frac{D_z}{z_{22}}$ $\frac{z_{12}}{z_{22}}$ $\frac{-z_{21}}{z_{22}}$ $\frac{1}{z_{22}}$	$\frac{1}{y_{11}}$ $\frac{-y_{12}}{y_{11}}$ $\frac{y_{21}}{y_{11}}$ $\frac{D_y}{y_{11}}$	h_{11} h_{12} h_{21} h_{22}	$\frac{a_{12}}{a_{22}}$ $\frac{D_a}{a_{22}}$ $\frac{-1}{a_{22}}$ $\frac{a_{21}}{a_{22}}$
a	$\frac{z_{11}}{z_{21}}$ $\frac{D_z}{z_{21}}$ $\frac{1}{z_{21}}$ $\frac{z_{22}}{z_{21}}$	$\frac{-y_{22}}{y_{21}}$ $\frac{-1}{y_{21}}$ $\frac{-D_y}{y_{21}}$ $\frac{-y_{11}}{y_{21}}$	$\frac{-D_h}{h_{21}}$ $\frac{-h_{11}}{h_{21}}$ $\frac{-h_{22}}{h_{21}}$ $\frac{-1}{h_{21}}$	a_{11} a_{12} a_{21} a_{22}

$D_z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$; $D_y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$; $D_h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$;
$D_a = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$.

Пример 5. Определить y-параметры транзистора П13, включенного по схеме с общей базой, если его h-параметры для этой же схемы включения в рабочей точке $I_к = 1$ *ма* и $U_{к.б} = -5$ *в* равны: $h_{11} = 34$ *ом*; $h_{12} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$; $h_{21} = -0{,}925$; $h_{22} = 1 \cdot 10^{-6}$ *сим*.

Решение. Формулы перехода от h-параметров к y-параметрам находим в табл. 3 на пересечении столбца h и строки y. В каждой из клеток таблицы аналитические выражения параметров расположены в таком же порядке, в каком расположены сами параметры в соответствующих системах уравнений и в матрицах. Следовательно,

$$y_{11} = \frac{1}{h_{11}} = \frac{1}{34} = 29\,400 \text{ мксим};$$

$$y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}} = -\frac{2,5\ 10^{-4}}{34} = -7,35 \text{ мксим};$$

$$y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}} = \frac{-0,925}{34} = -27\,200 \text{ мксим},$$

$$y_{22} = \frac{D_h}{h_{11}} = \frac{265 \cdot 10^{-6}}{34} = 7,8 \text{ мксим},$$

где

$$D_h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21} = 34 \cdot 1 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-4}(-0,925) = 265 \cdot 10^{-6}.$$

Вычисляя y-параметры транзистора, ни в коем случае не следует округлять полученные величины. Дело в том, что значения y-параметров могут понадобиться в дальнейшем для определения параметров, соответствующих другой схеме включения транзистора. Формулы перехода содержат разность величин исходных параметров. Поэтому округление величин может привести к значительным погрешностям в результатах расчета.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ РАЗНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ

Способ расчета, основанный на представлении транзистора в виде активного четырехполюсника, можно применять при любой схеме включения транзистора по переменному току. Однако величины параметров четырехполюсника, эквивалентного транзистору, очень сильно зависят от схемы включения транзистора по переменному току и изменяются при переходе от одной схемы включения к другой. Поэтому часто возникает задача: зная параметры транзистора в одной какой-нибудь схеме включения, определить эти же параметры для другой схемы включения. (Предполагается, что при изменении схемы включения транзистора по переменному току рабочая точка транзистора остается неизменной.)

Один из способов решения основан на следующих закономерностях. Как известно, для каждой из трех возможных схем включения можно составить систему уравнений с y-параметрами. Но некоторые из параметров будут повторяться в двух разных системах. В результате в трех системах уравнений, составленных для трех схем включения одного и того же транзистора, окажется не

12, а только 9 разных параметров. Если из этих девяти параметров составить таблицу в соответствии с рис. 5, то полученная таблица будет обладать интересным свойством: алгебраическая сумма величин параметров в каждом столбце и каждой строке таблицы будет равна нулю.

Принцип составления таблицы ясен из рисунка. Таблица имеет три столбца и три строки. Каждый столбец и каждая строка обозначены первой буквой названия одного из электродов транзистора. Параметры транзи-

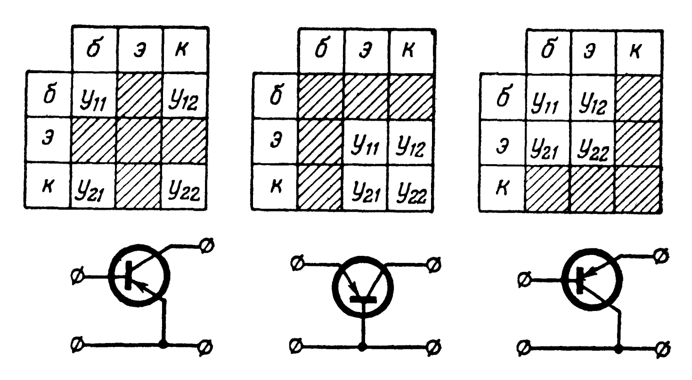


Рис 5 К определению параметров, соответствующих различным схемам включения транзистора

стора, соответствующие определенной схеме включения, заносятся в те клетки таблицы, которые остаются свободными после вычеркивания строки и столбца, помеченных названием общего (для данной схемы включения) электрода транзистора.

Поскольку сумма величин элементов каждой строки и столбца таблицы равна нулю, для составления таблицы достаточно знать только по две величины из трех, фигурирующих в каждом столбце или строке, т. е., по существу, достаточно знать параметры транзистора только в одной из схем включения.

Порядок перехода от параметров для одной схемы включения к параметрам для другой схемы включения таков:

1. Зная любую систему параметров для одной из схем включения транзистора, переходят (с помощью

табл. 3) к системе y-параметров для этой же схемы включения.

2. Из известных y-параметров составляют таблицу в соответствии с рис. 5, оставляя пустыми те клетки таблицы, которые на рисунке заштрихованы.

3. Заполняют пустые клетки таблицы числами с таким расчетом, чтобы сумма чисел в каждом столбце и в каждой строке таблицы равнялась нулю.

4. Вычеркивают строку и столбец таблицы, которые соответствуют общему электроду в новой схеме включения. Величины, оставшиеся незачеркнутыми, образуют матрицу y-параметров транзистора для новой схемы включения.

5. Переход от y-параметров к любой другой системе параметров можно осуществить с помощью табл. 3.

Таблица 4

	Б	Э	К
Б	*2 200*	*—2 200*	*—0,45*
Э	*—29 400*	29 400	—7,35
К	*27 200*	—27 200	7,8

Пример 6. Определить h-параметры транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером, если его y-парамегры в выбранной рабочей точке при включении по схеме с общей базой равны: $y_{11}=29\,400$ *мксим*; $y_{12}=-7{,}35$ *мксим*; $y_{21}=-27\,200$ *мксим*; $y_{22}=7{,}8$ *мксим*.

Решение. Руководствуясь рис. 5 (схема с общей базой), составляем таблицу из численных значений y-параметров для схемы с общей базой (см. табл. 4, прямой шрифт, величины параметров указаны в микросименсах). Заполняем, как сказано выше, пустые клетки таблицы (см. табл. 4, курсив). Зачеркивая среднюю строку и средний столбец таблицы, получаем матрицу y-параметров транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Из матрицы следует: $y_{11э}=2\,200$ *мксим*; $y_{12э}=-0{,}45$ *мксим*; $y_{21э}=27\,200$ *мксим*; $y_{22э}=7{,}8$ *мксим*.

Теперь, руководствуясь табл. 3, переходим от полученных y-параметров транзистора с общим эмиттером к h-параметрам транзистора с общим эмиттером:

$$h_{11э}=\frac{1}{y_{11э}}=\frac{1}{2\,200\cdot 10^{-6}}=455\ ом.$$

Аналогично находим: $h_{12э}=2{,}04\cdot 10^{-4}$; $h_{21э}=12{,}3$; $h_{22э}=13{,}3\cdot 10^{-6}$ *сим.*

Для проверки расчета и уменьшения объема вычислительной работы полезно иметь в виду, что определитель системы y-параметров D_y при неизменной рабочей точке имеет одинаковую величину при всех трех возможных схемах включения транзистора (с общим эмиттером, коллектором или базой).

Кроме того, параметр $h_{21э}$ транзистора с общим эмиттером численно равен коэффициенту усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером в режиме короткого замыкания B:

$$h_{21э} = B \approx \frac{|h_{21б}|}{1 - |h_{21б}|},$$

где $h_{21б}$ — параметр транзистора с общей базой.

В дальнейшем букву в индексе параметра, которая обозначает схему включения транзистора, будем сохранять только в тех случаях, когда ее отсутствие может привести к недоразумению или ошибкам.

РАСЧЕТ МНОГОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

При составлении блок-схемы усилителя, выборе рабочей точки каждого транзистора, а также при выборе схемы температурной стабилизации рабочей точки нуж-

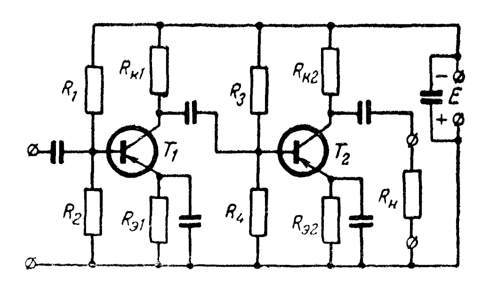


Рис. 6. Принципиальная схема двухкаскадного усилителя.

но отчетливо представлять себе характерные особенности каждой из схем включения транзистора, ее типичные параметры и, следовательно, усилительную способность каскада. Выбор сопротивлений резисторов в цепи коллектора и эмиттера и резисторов, образующих делитель для питания базы, обусловлен выбором рабочей

точки и требованиями к ее стабильности Одновременно следует учитывать распределение выходного (усиливаемого) тока каскада между сопротивлениями, входящими в схему каскада, и полезным сопротивлением нагрузки. Например, в схеме на рис 6 для увеличения тока (и напряжения) усиливаемого сигнала на выходе второго каскада следует по возможности увеличить ту часть выходного тока первого каскада, которая ответвляется в цепь базы второго транзистора. А для этого необходимо увеличить сопротивление резистора в цепи коллектора первого транзистора.

Таким образом, на этом этапе расчета применение малосигнальных параметров не требуется. Но после того, как составлена схема и определены величины входящих в нее сопротивлений, переходят к расчету ее коэффициента усиления, величин элементов цепей междукаскадной связи и отрицательной обратной связи. При выполнении этих расчетов применение малосигнальных параметров транзистора может оказать существенную пользу.

В качестве примера рассчитаем транзисторный усилитель, который, имея входное сопротивление $R_{вх}$ не более чем 500 *ом* и сопротивление нагрузки $R_н = 1$ *ком*, должен обеспечить коэффициент усиления напряжечия $K_н = 125$. Усилитель выполняется на транзисторах типа П13. Напряжение источника питания $E = 9$ *в*. Расчет ведем в такой последовательности

1 Определяем, сколько каскадов должен иметь усилитель. Для этого из формулы

$$K_н = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_2 R_н}{I_1 R_{вх}} = K_т \frac{R_н}{R_{вх}}$$

находим требуемый коэффициент усиления тока всего усилителя:

$$K_т = \frac{K_н R_{вх}}{R_н} = \frac{125 \cdot 500}{1\,000} = 62{,}5.$$

Ориентировочно можно считать, что один каскад усиления с резистивно-емкостной связью на транзисторе с общим эмиттером обеспечивает коэффициент усиления тока

$$K_{т1} \approx 0{,}7 h_{21э}.$$

Чтобы рассчитанная схема после ее реализации обеспечивала требуемый коэффициент усиления без предварительного отбора транзисторов по величине параметра $h_{21э}$ (или B), при расчете следует исходить из приводимой в справочниках минимально допустимой величины параметра h_{21}. Для транзистора типа П13 $h_{21э\,мин}=12$

Зная коэффициент тока всего усилителя $K_т$ и коэффициент усиления тока $K_{т1}$ одного каскада, определяем число каскадов усилителя N В нашем случае требуемое усиление можно получить с помощью двух каскадов.

2. Определяем величины сопротивлений схемы усилителя, при которых будет обеспечена выбранная рабочая точка и коэффициент температурной нестабильности тока коллектора S Принимаем ток коллектора каждого транзистора $I_к=1$ *ма,* напряжение коллектор — эмиттер $U_{кэ}=-5$ *в,* коэффициент температурной нестабильности тока коллектора $S=\frac{dI_к}{dI_{к0}}=2$ Выбираем схему температурной стабилизации с делителем напряжения в цепи базы (рис. 6). Поскольку $E=9$ *в,* а $U_{кэ}=-5$ *в*, то суммарное падение напряжения на резисторах $R_э$ и $R_к$, включенных в цепь эмиттера и коллектора каждого транзистора, равно:

$$\Delta U=E-|U_{кэ}|=9-5=4\ в$$

Полагая $I_э\approx I_к$, определим сумму сопротивлений резисторов $R_э$ и $R_к$:

$$R_э+R_к\approx\frac{\Delta U}{I_к}=\frac{4}{1\cdot 10^{-3}}=4\ ком.$$

Разбиваем полученную величину на два сопротивления, руководствуясь следующими соображениями.

1. Сопротивление резистора $R_к$ в цепи коллектора должно в несколько раз превышать величину нагрузочного сопротивления каскада. Чем больше сопротивление $R_к$ (при заданном сопротивлении нагрузки каскада), тем больше коэффициент усиления каскада по току.

2. Сопротивление резистора $R_э$ нельзя выбрать слишком малым чем больше это сопротивление (при заданном токе коллектора), тем лучше температурная стабилизация рабочей точки Практически для обеспечения хорошей стабилизации необходимо, чтобы падение на-

пряжения на сопротивлении резистора $R_э$ составляло 10—20% от величины напряжения источника питания.

В нашем случае оба требования будут выполнены, если принять

$$R_{к1}=R_{к2}=2{,}7\ ком,\ R_{э1}=R_{э2}=1{,}3\ ком.$$

Чтобы определить величины сопротивлений делителя напряжения в цепи базы транзистора, вычисляем вспомогательный расчетный параметр $R_{ст\,э}$ (эквивалентное стабилизирующее сопротивление):

$$R_{ст.э}=\frac{E}{I_к}\frac{B_п+1-S}{B_п+1}=\frac{9}{1\cdot 10^{-3}}\cdot\frac{12+1-2}{12+1}=7{,}6\ ком,$$

где S — принятый коэффициент температурной нестабильности каскада, $B_п$ — коэффициент усиления транзистора по постоянному току. Для транзисторов малой мощности при токах коллектора, не превышающих несколько *ма,* можно считать:

$$B_п\approx h_{21э}.$$

Величины сопротивлений делителя определяем по формулам

$$R_1=B_п\left(\frac{E}{I_к}-R_{ст.э}\right)=$$

$$=12\left(\frac{9}{1\cdot 10^{-3}}-7{,}6\cdot 10^3\right)=17\ ком;$$

$$R_2=\frac{R_1R_э}{R_{ст.э}-R_э}=\frac{17\cdot 1{,}3}{7{,}6-1{,}3}=3{,}5\ ком.$$

3. Для расчета усилителя по переменной составляющей составим эквивалентную схему для средних частот рабочего диапазона.

При составлении схемы учитываем, что отрицательный зажим батареи имеет по переменной составляющей такой же потенциал, как и общая точка схемы. Поэтому все элементы, подключенные на принципиальной схеме к отрицательному зажиму, соединяем на эквивалентной схеме с общей точкой. Разделительные емкости при правильном расчете имеют на средних частотах достаточно малое сопротивление, и на эквивалентной схеме их не изображаем. Аналогично, емкости, которые шунтируют

резисторы в цепях эмиттеров, представляют практически короткое замыкание для токов средних частот рабочего диапазона. Следовательно, можно считать, что эмиттер каждого транзистора соединен непосредственно с общей точкой схемы. Каждый транзистор принципиальной схемы заменяем в эквивалентной схеме четырехполюсником. В результате эквивалентная схема усилителя (на рис. 6) приобретает вид, показанный на рис. 7.

Принимаем такой порядок расчета. Сначала определим коэффициент усиления по току каждого транзистора (двигаясь от последующих каскадов к предыдущим,

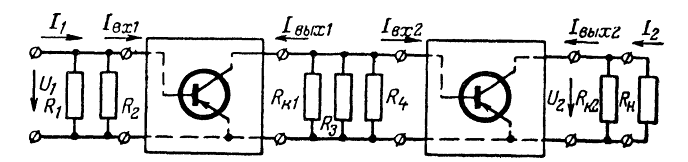


Рис. 7. Эквивалентная схема двухкаскадного усилителя для средних звуковых частот.

т. е. от выходных зажимов усилителя к его входным зажимам). Затем определим коэффициент усиления по току всего усилителя, а после этого — коэффициент усиления по напряжению. При расчете будем применять формулы табл. 2. Параметры обоих транзисторов в выбранной рабочей точке принимаем равными $h_{11}=450$ *ом;* $h_{12}=2\cdot10^{-4}$; $h_{21}=12$; $h_{22}=13\cdot10^{-6}$ *сим.* (Это округленные значения h-параметров, полученные при решении примера 6.) Округление величин параметров в пределах нескольких процентов в данном случае вполне допустимо, потому что округленные величины будут использованы не для определения параметров транзисторов в другой схеме включения, а для расчета параметров усилительного каскада.

Рассматривая эквивалентную схему усилителя на рис. 7, убеждаемся, что нагрузка второго транзистора $Z_{н2}$ образована сопротивлениями резистора $R_{к2}$ и $R_н$, соединенными параллельно. Результирующая проводимость нагрузки

$$Y_{н2}=\frac{1}{Z_{н2}}=\frac{1}{R_{к2}}+\frac{1}{R_н}=\frac{1}{2,7\cdot10^3}+\frac{1}{1\cdot10^3}=1,37\cdot10^{-3}\ сим.$$

С учетом этого коэффициент усиления по току второго транзистора равен:

$$K_{т2}=\frac{h_{21}Y_{н2}}{h_{22}+Y_{н2}}=\frac{12\cdot 1{,}37\cdot 10^{-3}}{13\cdot 10^{-6}+1{,}37\cdot 10^{-3}}\approx 11{,}9.$$

Входное сопротивление второго транзистора

$$Z_{вх2}=\frac{D_h+h_{11}Y_{н2}}{h_{22}+Y_{н2}}=\frac{3{,}45\cdot 10^{-3}+450\cdot 1{,}37\cdot 10^{-3}}{13\cdot 10^{-6}+1{,}37\cdot 10^{-3}}=450\ \textit{ом},$$

где

$$D_h=h_{11}h_{22}-h_{12}h_{21}=450\cdot 13\cdot 10^{-6}-2\cdot 10^{-4}\cdot 12=3{,}45\cdot 10^{-3}.$$

Нагрузкой первого четырехполюсника (транзистора) являются сопротивления резисторов $R_{к1}$, R_3, R_4 и $Z_{вх2}$, соединенные параллельно. Эквивалентная проводимость нагрузки первого транзистора

$$Y_{н1}=\frac{1}{R_{к1}}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{Z_{вх2}}=\frac{1}{2{,}7}+\frac{1}{17}+$$
$$+\frac{1}{3{,}5}+\frac{1}{0{,}45}=2{,}92\ \textit{мсим}.$$

Коэффициент усиления по току первого транзистора

$$K_{т1}=\frac{h_{21}Y_{н1}}{h_{22}+Y_{н1}}=\frac{12\cdot 2{,}92\cdot 10^{-3}}{13\cdot 10^{-6}+2{,}92\cdot 10^{-3}}\approx 12.$$

Входное сопротивление первого транзистора

$$Z_{вх1}=\frac{D_h+h_{11}Y_{н1}}{h_{22}+Y_{н1}}=\frac{3{,}45\cdot 10^{-3}+450\ 2{,}92\cdot 10^{-3}}{13\cdot 10^{-6}+2{,}92\cdot 10^{-3}}=450\ \textit{ом}.$$

При определении коэффициента усиления по току всего усилителя следует учесть, что вследствие шунтирующего действия резисторов R_1 и R_2 на вход первого четырехполюсника попадает не весь входной ток I_1 усилителя, а только часть его, равная

$$\frac{I_{вх1}}{I_1}=\frac{Z_{вх}}{Z_{вх1}}=\frac{1}{Y_{вх}Z_{вх1}},$$

где $Y_{вх}=1/Z_{вх}$ — входная проводимость усилителя.

Обозначения токов здесь и далее соответствуют рис. 7.

В свою очередь выходной ток первого четырехполюсника разветвляется между четырьмя резисторами, и на

вход второго четырехполюсника попадает только часть его:

$$\frac{I_{вх2}}{I_{вых1}}=-\frac{Z_{н1}}{Z_{вх2}}=\frac{-1}{Y_{н1}Z_{вх2}}.$$

(Знак «минус» в последней формуле обусловлен тем обстоятельством, что положительные направления токов $I_{вых1}$ и $I_{вх2}$ противоположны друг другу.)

Наконец, в сопротивление нагрузки $R_н$ ответвляется только часть выходного тока второго четырехполюсника:

$$\frac{I_2}{I_{вых2}}=\frac{Z_{н2}}{R_н}=\frac{1}{Y_{н2}R_н}.$$

Таким образом, коэффициент усиления по току всего усилителя будет равен:

$$K_т=\frac{1}{Y_{вх}Z_{вх1}}K_{т1}\frac{-1}{Y_{н1}Z_{вх2}}K_{т2}\frac{1}{Y_{н2}R_н}=$$

$$=\frac{-12\cdot 11{,}9}{2{,}57\cdot 10^{-3}\cdot 450\cdot 2{,}92\cdot 10^{-3}\cdot 450\cdot 1{,}37\cdot 10^{-3}\cdot 1\cdot 10^{3}}=-68,$$

где

$$Y_{вх}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{Z_{вх1}}=\frac{1}{17}+\frac{1}{3{,}5}+\frac{1}{0{,}45}=2{,}57\cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_н=-K_т\frac{Z_н}{Z_{вх}}=-K_тR_нY_{вх}=$$

$$=-(-68)\cdot 1\cdot 10^{3}\cdot 2{,}57\cdot 10^{-3}=175.$$

Знак «минус» в последней формуле обусловлен выбором положительных направлений выходного напряжения и тока четырехполюсника (см. рис. 2 и 7).

Полученная в результате точного расчета величина $K_н$ оказалась несколько выше требуемой. Это дает возможность ввести в схему усилителя отрицательную обратную связь, которая повышает стабильность коэффициента усиления.

Расчет усилителя можно было бы выполнить и другим способом — непосредственно «по напряжению». Для

этого требуется найти коэффициенты усиления по напряжению для каждого каскада и перемножить их. Однако первый способ (расчет «по току») более наглядно отражает физические процессы, которые лежат в основе работы транзисторного усилителя (распределение и усиление тока).

О расчете элементов междукаскадной связи заметим следующее. В формулы для определения величин этих элементов обязательно входит величина выходного сопротивления той части схемы, которая предшествует определяемому элементу, а также величина входного сопротивления той части схемы, которая лежит после определяемого элемента. Для определения этих сопротивлений можно воспользоваться формулами входного и выходного сопротивления четырехполюсника, имеющимися в табл. 2.

ВИДЫ СОЕДИНЕНИЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

В предыдущем параграфе было рассмотрено такое соединение четырехполюсников, при котором выходные зажимы предыдущего четырехполюсника соединяются с входными зажимами последующего (рис. 8,*а*). При разработке схемы транзисторного усилителя прибегают также и к другим видам соединения четырехполюсников. На рис. 8,*б* изображено параллельное соединение двух четырехполюсников. «Входы» или, точнее, входные сопротивления обоих четырехполюсников соединены параллельно. То же сделано и с выходными зажимами четырехполюсников.

Соединение, показанное на рис. 8,*в*, называется последовательным. В этом случае «входы» (входные сопротивления) обоих четырехполюсников соединены последовательно. Выходные сопротивления также соединены последовательно.

На рис. 8,*г* изображено последовательно-параллельное соединение четырехполюсников: четырехполюсники соединены последовательно со стороны входных зажимов и параллельно со стороны выходных.

Для облегчения расчетов таких соединений желательно иметь формулы, которые давали бы возможность без громоздких вычислений переходить от параметров двух исходных соединенных определенным образом четырех-

полюсников к параметрам четырехполюсника, эквивалентного двум соединенным. Анализ показывает, что возможность такого перехода действительно существует, но для каждого из рассмотренных соединений переход можно легко осуществить только в одной, характерной для данного соединения системе параметров.

Например, для четырехполюсника, эквивалентного двум параллельно соединенным, каждый из *y*-параметров его равен сумме соответствующих параметров

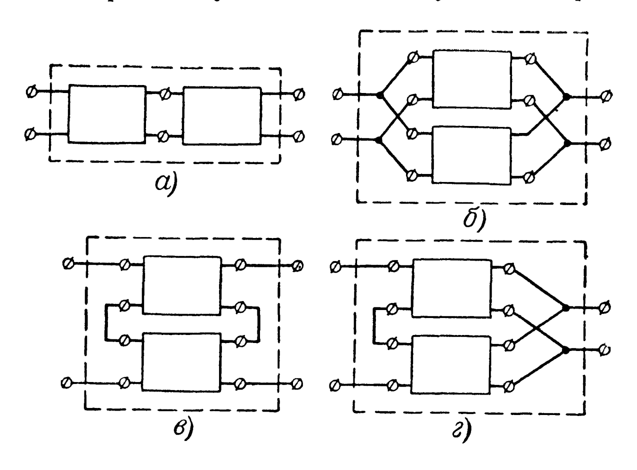


Рис. 8. Виды соединений четырехполюсников.
а — каскадное; *б* — параллельное; *в* — последовательное; *г* — последовательно-параллельное.

соединяемых четырехполюсников. Эквивалентный четырехполюсник показан на рис. 8,*б* штриховой линией.

При последовательном соединении двух четырехполюсников каждый из *z*-параметров получаемого эквивалентного четырехполюсника равен сумме соответствующих *z*-параметров исходных.

При последовательно-параллельном соединении *h*-параметры эквивалентного четырехполюсника находят путем суммирования *h*-параметров исходных четырехполюсников. Наконец, при каскадном соединении *a*-параметры эквивалентного четырехполюсника можно выразить через *a*-параметры исходных (но суммирование здесь неприменимо!). Процесс расчета поясним несколькими примерами.

Пример 7. Определить коэффициент усиления по току однокаскадного усилителя, изображенного на рис. 9,*а*, если $R_к=10$ *ком*, $R_б=50$ *ком*, а транзистор имеет такие же параметры, как и в примере расчета многокаскадного усилителя.

Решение. Составим эквивалентную схему каскада для средних частот, заменяя транзистор четырехполюсником (рис. 9,*б*). При-

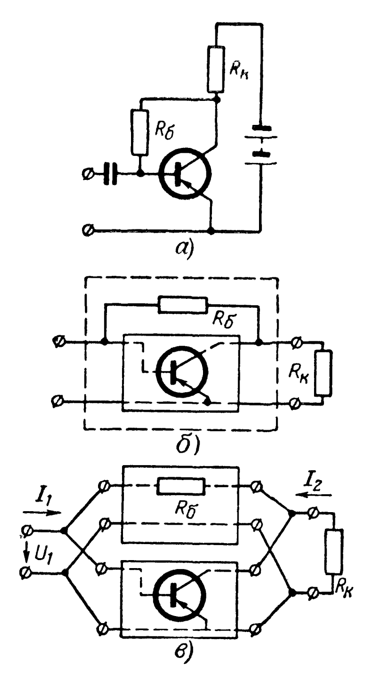


Рис. 9. К расчету усилителя с параллельной отрицательной обратной связью.

а — принципиальная схема усилителя; *б* и *в* — эквивалентные схемы при средних звуковых частотах.

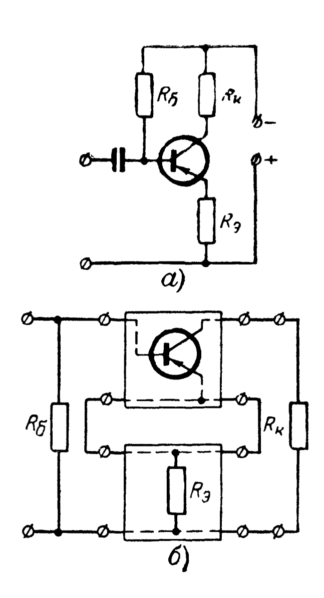


Рис. 10. К расчету усилителя с последовательной отрицательной обратной связью.

а — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема при средних звуковых частотах.

менить к расчету этой схемы формулы табл. 2 нельзя, потому что они составлены для случая, когда связь генератора с нагрузкой осуществляется исключительно через четырехполюсник. Между тем, в схеме на рис. 9,*б* связь генератора с нагрузкой осуществляется не только через четырехполюсник, но и через внешнее (по отношению к четырехполюснику) сопротивление $R_б$. Но параметры схемы на рис. 9,*б* можно было бы легко рассчитать, если предварительно найти параметры четырехполюсника, эквивалентного той части схемы, которая на рисунке заключена в штриховую рамку. Для решения этой задачи представим сопротивление $R_б$ в виде отдельного

четырехполюсника (рис. 9,*в*). Из рисунка видно, что четырехполюсники соединены параллельно. Чтобы вычислить параметры эквивалентного им четырехполюсника, нужно найти *y*-параметры каждого из них. Будем обозначать *y*-параметры транзистора индексом «т», *y*-параметры одноэлементного четырехполюсника — индексом «с», а *y*-параметры четырехполюсника, эквивалентного двум соединенным, — цифровыми индексами без букв.

Параметры транзистора (см. пример 6):

$$y_{11т}=2\,200\ мксим;\ y_{12т}=-0{,}45\ мксим;$$
$$y_{21т}=27\,200\ мксим;\ y_{22т}=7{,}8\ мксим.$$

Параметры одноэлементного четырехполюсника находим по табл. 1:

$$y_{11с}=-y_{12с}=-y_{21с}=y_{22с}=\frac{1}{R_б}=20\cdot 10^{-6}=20\ мксим.$$

Параметры эквивалентного четырехполюсника:

$$y_{11}=y_{11т}+y_{11с}=2\,200+20=2\,220\ мксим;$$
$$y_{12}=y_{12т}+y_{12с}=-0{,}45+(-20)\approx-20{,}4\ мксим;$$
$$y_{21}=y_{21т}+y_{21с}=27\,200+(-20)\approx 27\,200\ мксим;$$
$$y_{22}=y_{22т}+y_{22с}=7{,}8+20=27{,}8\ мксим.$$

Коэффициент усиления усилителя по току

$$K_т=\frac{y_{21}Y_н}{D_y+y_{11}Y_н}=\frac{27{,}2\cdot 10^{-3}\cdot 10^{-4}}{6{,}17\cdot 10^{-7}+2{,}22\cdot 10^{-3}\cdot 10^{-4}}=3{,}25.$$

Пример 8. Определить входное сопротивление усилителя, схема которого изображена на рис. 10,*а*, если $R_к=10$ *ком*, $R_э=1$ *ком*, $R_б=80$ *ком*, а параметры транзистора те же, что и в предыдущем примере.

Решение. Составляем эквивалентную схему усилителя, изображая транзистор и сопротивление $R_э$ в виде четырехполюсников (рис. 10,*б*). В полученной схеме четырехполюсники соединены последовательно. При таком соединении удобно оперировать с *z*-параметрами.

Параметры транзистора находим, пользуясь формулами перехода от *y*-параметров к *z*-параметрам. Вычисления дают:

$$z_{11т}=265\ ом;\ z_{12т}=15\ ом;$$
$$z_{21т}=-925\cdot 10^3\ ом;\ z_{22т}=75\cdot 10^3\ ом.$$

По табл. 1 находим параметры одноэлементного четырехполюсника:

$$z_{11с}=z_{12с}=z_{21с}=z_{22с}=R_э=1\cdot 10^3\ ом.$$

Складывая соответствующие параметры транзистора и одноэлементного четырехполюсника, получим параметры четырехполюс-

ника, эквивалентного двум соединенным: $z_{11}=1,26\cdot10^3$ *ом*; $z_{12}=1,015\cdot10^3$ *ом*; $z_{21}=-924\cdot10^3$ *ом*, $z_{22}=76\cdot10^3$ *ом*.

Входное сопротивление транзистора при включенном в цепь эмиттера сопротивлении $R_э$:

$$Z_{вх.т}=\frac{D_z+z_{11}Z_н}{z_{22}+Z_н}=\frac{1\,066\cdot10^6+1,26\cdot10^3\cdot10^4}{76\cdot10^3+10\cdot10^3}=12,5\ ком.$$

Входное сопротивление усилителя

$$Z_{вх}=\frac{Z_{вх.т}R_б}{Z_{вх.т}+R_б}=\frac{12,5\cdot80}{12,5+80}=10,8\ ком.$$

Пример 9. Определить коэффициент усиления по напряжению двухкаскадного усилителя, охваченного цепью обратной связи. Схема усилителя изображена на рис. 11. Нагрузкой усилителя является резистор R_5 Величины всех сопротивлений резисторов указаны на схеме. Параметры транзисторов те же, что и в примере 7.

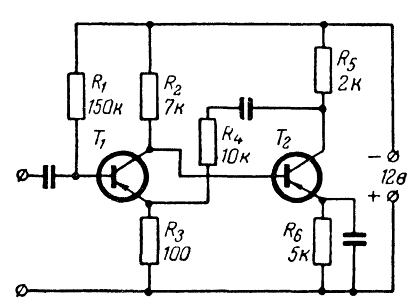


Рис. 11. Двухкаскадный усилитель, охваченный цепью обратной связи.

Решение Эквивалентную схему усилителя целесообразно представить в виде двух четырехполюсников собственно усилителя и четырехполюсника обратной связи Оба четырехполюсника показаны штриховыми линиями на рис. 12 Эти четырехполюсники соединены друг с другом последовательно-параллельно При таком соединении удобно оперировать с h-параметрами: каждый из h-параметров сложного четырехполюсника равен сумме соответствующих h-парамегров соединенных четырехполюсников. Параметры четырехполюсника обратной связи можно непосредственно взять из табл 1. Что же касается h-параметров усилителя, то их определение усложняется тем обстоятельством, что четырехполюсник-усилитель в свою очередь состоит из трех четырехполюсников, соединенных каскадно Поэтому сначала необходимо по известным параметрам этих трех четырехполюсников найти параметры эквивалентного.

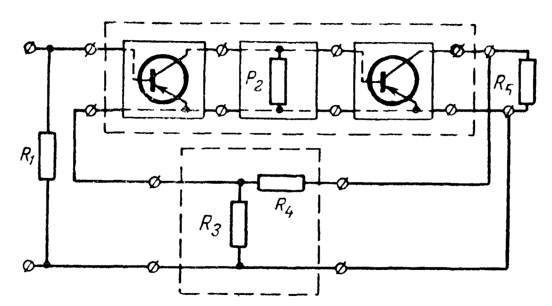


Рис. 12. Эквивалентная схема усилителя с цепью обратной связи.

При определении параметров четырехполюсника, эквивалентного двум, соединенным каскадно, удобно оперировать с системой обобщенных параметров (a-параметров).

Система уравнений с a-параметрами имеет вид:

$$U_1 = a_{11}U_2 + a_{12}(-I_2),$$
$$I_1 = a_{21}U_2 + a_{22}(-I_2).$$

Иногда для обозначения этих параметров применяют соответственно буквы A, B, C и D. Но учитывая, что во всех других системах уравнений применялись для обозначения параметров одной системы не разные буквы, а разные цифровые индексы, целесообразно и в данном случае сохранить такой же способ обозначения

Если a-параметры первого из двух каскадно соединяемых четырехполюсников обозначить буквой a с одним штрихом, а параметры второго — буквой с двумя штрихами, то a-параметры четырехполюсника, эквивалентного двум соединенным, можно найти по формулам:

$$a_{11} = a'_{11}a''_{11} + a'_{12}a''_{21};$$
$$a_{12} = a'_{11}a''_{12} + a'_{12}a''_{22};$$
$$a_{21} = a'_{21}a''_{11} + a'_{22}a''_{21};$$
$$a_{22} = a'_{21}a''_{12} + a'_{22}a''_{22}$$

Подчеркнем, что эти формулы справедливы только в том случае, если параметры с одним штрихом относятся к четырехполюснику, обращенному ко входным зажимам рассчитываемой цепи, а параметры с двумя штрихами — к четырехполюснику, обращенному к выходным зажимам цепи.

Итак, по известным h-параметрам транзистора (пример 7) определяем a-параметры, пользуясь табл. 2:

$$a_{11} = -0{,}29 \cdot 10^{-3};\quad a_{12} = -37{,}5\ \textit{ом};$$
$$a_{21} = -1{,}08 \cdot 10^{-6}\ \textit{сим};\quad a_{22} = -0{,}0835.$$

Параметры одноэлементного четырехполюсника, образованного резистором R_2, находим в табл. 1:

$$a_{11}=1;\ a_{12}=0;\ a_{21}=\frac{1}{R_2}=0,143\cdot10^{-3}\ \textit{сим};\ a_{22}=1.$$

Определяем a-параметры четырехполюсника, эквивалентного двум первым (со стороны входа) каскадно соединенным четырехполюсникам:

$$a_{11}=a'_{11}a''_{11}+a'_{12}a''_{21}=-0,29\cdot10^{-3}\cdot1+(-37,5)\cdot0,143\cdot10^{-3}=$$
$$=-5,6\cdot10^{-3}.$$

Аналогичным образом находим:

$$a_{12}=-37,5\ \textit{ом};\ a_{21}=-13\cdot10^{-6}\ \textit{сим};\ a_{22}=-83,5\cdot10^{-3}.$$

Эквивалентный четырехполюсник, параметры которого мы нашли, каскадно соединен с третьим четырехполюсником рассматриваемой цепочки (т. е. с транзистором) Рассмотренным выше способом можно найти a-параметры этого соединения, т. е. a-параметры всего четырехполюсника-усилителя.

$$a_{11}=42\cdot10^{-6};\ a_{12}=3,34\ \textit{ом};\ a_{21}=94\cdot10^{-9}\ \textit{сим};\ a_{22}=7,5\cdot10^{-3}.$$

Интересно отметить, что в данном случае определитель системы $D_a=0$. Поскольку $h_{12}=(D_a/a_{22})$, то равенство определителя D_a нулю означает, что напряжение с выхода усилителя по внутренним цепям обратной связи на вход усилителя практически не поступает.

Переходя по формулам табл. 3 от a-параметров к h-параметрам, находим:

$$h_{11у}=450\ \textit{ом};\ h_{12у}=0;\ h_{21у}=-133;\ h_{22}=12,5\cdot10^{-6}\ \textit{сим},$$

где индекс «у» означает, что параметры относятся к верхнему на рис. 12 четырехполюснику (усилителю).

Параметры четырехполюсника обратной связи определяем по формулам табл. 1, полагая в них $z_1=1\cdot10^4$ *ом*, $z_2=100$ *ом*. Вычисление дает: $h_{11с}=99$ *ом*; $h_{12с}=1\cdot10^{-2}$; $h_{21с}=-1\cdot10^{-2}$; $h_{22с}=1\cdot10^{-4}$ *сим*, где индекс «с» означает, что параметры относятся к четырехполюснику обратной связи.

Параметры всего усилителя находим, суммируя параметры обоих четырехполюсников:

$$h_{11}=h_{11у}+h_{11с}=450+99=549\ \textit{ом}.$$

Аналогично получаем. $h_{12}=1\cdot10^{-2}$; $h_{21}=-133$, $h_{22}=1\cdot10^{-4}$ *сим*.

Коэффициент усиления по напряжению всего усилителя, охваченного отрицательной обратной связью:

$$K_н=\frac{-h_{21}Z_н}{h_{11}+D_hZ_н}=\frac{-(-133)\cdot2\cdot10^3}{549+1,39\cdot2\cdot10^3}=80,$$

Рассмотренные примеры свидетельствуют о том, что, применяя методы и формулы теории четырехполюсника, всегда можно рассчитать любую из схем усилителей.

О РАСЧЕТЕ h-ПАРАМЕТРОВ МНОГОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Наиболее трудоемкой частью расчета многокаскадного усилителя, охваченного обратной связью, оказывается определение h-параметров всего усилителя. Это объясняется сложной структурой формул для определения a-параметров при каскадном соединении четырехполюсников. Объем вычислительной работы можно уменьшить, если определить h-параметры многокаскадного усилителя, не прибегая к промежуточному вычислению a-параметров.

Покажем, как это можно сделать, на примере предыдущей задачи. Параметр $h_{11у}$ численно равен входному сопротивлению усилителя в режиме короткого замыкания его выходных зажимов. Если предположить, что сопротивление нагрузки второго транзистора равно нулю, то его входное сопротивление равно величине h_{11}. Поскольку $R_2 \gg h_{11}$, то сопротивление нагрузки первого транзистора практически равно h_{11}. Можно считать, что первый транзистор работает в режиме короткого замыкания. Следовательно, $h_{11у}=h_{11}=450$ *ом*.

По этой же причине ($R_2 \gg h_{11}$) можно считать, что второй четырехполюсник со стороны входных зажимов работает в режиме холостого хода. Следовательно, для второго транзистора при включении источника напряжения $U_{вых}$ в выходную цепь отношение $U_{вх}/U_{вых}$ равно величине h_{12}. Для всего усилителя при разомкнутых входных зажимах

$$h_{12у}=h^2_{12}=(2\cdot 10^{-4})^2=4\cdot 10^{-8}.$$

Коэффициент усиления всего усилителя по току в режиме короткого замыкания равен:

$$h_{21у}=h_{21}\frac{-R_2}{R_2+h_{11}}h_{21}=12\frac{-7\cdot 10^3}{7\cdot 10^3+450}12=-133,$$

где множитель $-R_2/(R_2+h_{11})$ учитывает распределение выходного тока первого транзистора между сопротивле-

нием R_2 и входным сопротивлением h_{11} второго транзистора.

Выходное сопротивление усилителя практически определяется параметрами второго транзистора и сопротивления R_2. Подставляя в формулу выходного сопротивления (табл. 3) значение $Z_г=R_2=7\cdot10^3$ *ом*, получим:

$$Z_{вых}=\frac{h_{11}+Z_г}{D_h+h_{22}Z_г}=\frac{450+7\cdot10^3}{3,45\cdot10^{-3}+13\cdot10^{-6}\cdot7\cdot10^3}=79\ ком.$$

$$h_{22у}=\frac{1}{Z_{вых}}=12,7\cdot10^{-6}\ сим.$$

Сравнивая полученные значения параметров $h_у$ с найденными в предыдущем параграфе, убеждаемся, что они практически не отличаются друг от друга.

Возникает вопрос: при каких значениях нагрузочных сопротивлений допустимо считать, что транзистор работает в режиме короткого замыкания.

Критерием работы в режиме, близком к режиму короткого замыкания, является условие

$$R_н \ll \frac{1}{h_{22}}.$$

Если это условие не выполняется, или сопротивление нагрузки имеет комплексный характер, то коэффициент усиления и величину входного сопротивления следует определять покаскадно. Но и в этом случае объем вычислений оказывается меньше, чем при определении a-параметров.

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ОТ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Если в процессе расчета каскада выбирается рабочая точка, отличающаяся от той, для которой известны типичные или непосредственно измеренные параметры транзистора, то необходимо пересчитать эти известные параметры в соответствии с выбранной рабочей точкой. Для пересчета служат графики рис. 13 и 14. Первый характеризует зависимость h-параметров транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, от напряжения коллектор — эмиттер. Второй — зависимость тех же

параметров от тока коллектора. Оба семейства кривых относятся к транзисторам типа П13. Однако они, в первом приближении, являются справедливыми и для транзисторов других типов, если последние рассчитаны на такую же мощность рассеяния и получены с помощью такой же технологии, как и транзисторы типа П13.

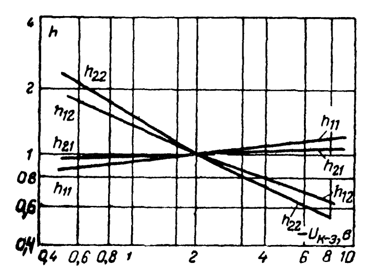


Рис. 13. Зависимость h-параметров транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером, от напряжения коллектор — эмиттер.

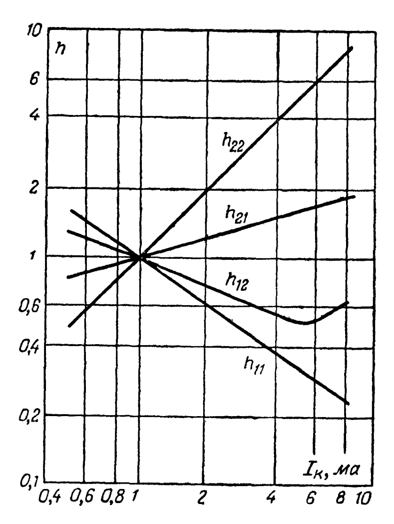


Рис. 14. Зависимость h-параметров транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером, от тока коллектора.

Пример 10. Значение параметра h_{11} транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером, равно:

$$h_{11}=450 \text{ ом при } U_{к.э}=-5 \text{ в и } I_к=1 \text{ ма}.$$

Определить величину этого параметра:

а) при $U_{к.э}=-1$ *в* и $I_к=1$ *ма*;

б) при $U_{к.э}=-1$ *в* и $I_к=0{,}5$ *ма*.

Решение. 1. Для перехода к новому значению напряжения в рабочей точке служат кривые семейства на рис. 13. При построении этого семейства кривых за единицу величины каждого из параметров принято значение параметра при $U_{к.э}=-2$ *в*. По графику параметра h_{11} на этом семействе определяем, что при неизменном токе коллектора

$$h_{11}(-5\ в)\approx 1{,}1\, h_{11}(-2\ в),$$
$$h_{11}(-1\ в)\approx 0{,}95\, h_{11}(-2\ в),$$

где в скобках указано напряжение $U_{к.э}$.

Следовательно,

$$h_{11}(-1\ в)=\frac{0{,}95}{1{,}1}\, h_{11}(-5\ в)=\frac{0{,}95}{1{,}1}\, 450=390 \text{ ом}.$$

2 Для перехода к новому значению тока в рабочей точке служат кривые семейства на рис. 14. При построении кривых за единицу величины каждого параметра принято значение параметра при токе $I_к = 1$ *ма*

По графику параметра h_{11} определяем, что при неизменном значении напряжения $U_{к\,э}$

$$h_{11}(0{,}5\ ма) \approx 1{,}6\ h_{11}\ (1\ ма).$$

Ранее мы нашли, чго $h_{11}(-1\ в;\ 1\ ма) = 390$ *ом*.
Следовательно,

$$h_{11}(-1\ в;\ 0{,}5\ ма) = 1{,}6\, h_{11}(-1\ в,\ 1\ ма) = 1{,}6 \cdot 390 \approx 620\ ом.$$

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 08 коп.